

# 交流インピーダンスを本質的に理解する実験教材の開発

著者	柴田 幸司, 片岡 潤二, 花田 一磨
著者別名	SHIBATA Kouji, KATAOKA Jyunji, HANADA Kazuma
雑誌名	八戸工業大学紀要
巻	37
ページ	179-189
発行年	2018-03-31
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1078/00003835/">http://id.nii.ac.jp/1078/00003835/</a>

# 交流インピーダンスを本質的に

## 理解する実験教材の開発

柴田 幸司<sup>†</sup>・片岡 潤二<sup>††</sup>・花田 一磨<sup>†††</sup>

### Development of Experiment Teaching Materials for Essentially Understanding AC Impedance

Kouji SHIBATA<sup>†</sup>, Jyunji KATAOKA<sup>††</sup> and Kazuma HANADA<sup>†††</sup>

#### ABSTRACT

In this report, creation of the experiment teaching course for essentially understanding the AC impedance through measurement of the frequency characteristic of the complex impedance of the electric circuit, and its teaching method and procedure are explained. For that purpose, Vector Network Analyzer (VNA), which became available at a low price in recent years, was newly purchased in FY 2017 at the department of the university to which the authors belongs. Next, we applied it to the experiment and practical lecture which measures the frequency characteristic of the electric characteristics of the electric circuit combining the LCR element using this equipment. Accordingly, a textbook for teaching used in these experiments were also created. As a result, education through practical training in the following items was implemented. 1. Derivation of a theoretical expression corresponding to an equivalent circuit of an electric circuit, 2. Construction of electric circuit using breadboard, 3. Calibration of measurement equipment, 4. Measurement of input impedance characteristics by the created electric circuit, 5. Consideration of results, 6. Group discussion, 7. Summary of the results, 8. Preparation of the report and correction by the teacher. Accordingly, it is considered that the essential understanding of the electric circuit could be realized by comparison with the contents of the lesson taught in the lecture on electrical circuits etc. This practical lesson does not require conventional expensive measuring instruments. Accordingly, it seems to be also effective for practical training of measurement of circuit characteristics of electric circuits in industrial high schools and similar. In the future, it is necessary to develop of experiment teaching course and similar for neighboring industrial high school students through collaboration between high school and university.

**Key Words:** Input impedance, S parameter, Vector network analyzer, VNA, Calibration

**キーワード:** 入力インピーダンス, Sパラメータ, ベクトルネットワークアナライザ, VNA, 校正

#### 1. はじめに

平成 30 年 1 月 9 日 受付

<sup>†</sup> 工学部電気電子システム学科・准教授

<sup>††</sup> 工学部電気電子システム学科・4 年

<sup>†††</sup> 工学部電気電子システム学科・講師

八戸工業大学工学部電気電子システム学科では、電気回路の基礎<sup>1)</sup>を教授すべく、長年にわたり学部の 2 年次に交流インピーダンスを理解する実験科目が実施されていた。しかし、この実験では以

下の問題が存在した。

1. インダクタのインピーダンスの測定では絶対値しか測定させておらず、理論値と複素数として比較（位相を測定）していない。しかし、交流回路では寄生容量（インピーダンスの虚数部）を複素数として測定しなければ（インダクタンス値のみでは）位相の概念も含めた交流回路の本質が理解できない
2. キャパシタの交流インピーダンスも絶対値しか測らせていない。しかし、静電容量だけでなくインピーダンスの虚数も含めた複素数として測定し理論値と比較せねば交流測定の意味が無い
3. RC 直列回路, LC 並列回路, RLC 直列回路もインピーダンスの測定では絶対値しか測っていない。しかし、複素インピーダンスを測定せねば交流回路の本質は理解できない
4. 理論値として複素インピーダンスに相当するインピーダンスの絶対値と位相角を計算するが、極座標（複素数  $(R+jX)$  すなわち複素インピーダンス）の形でプロットさせておらず、交流インピーダンスの本質が理解できない
5. 電力（電圧）反射係数を測定させておらず、電力（エネルギー）の流れと入出力の本質<sup>2,3)</sup>が理解できない

一方、近年 RF CMOS プロセスを代表とした、シリコンを用いた半導体集積回路の微細化や、デジタル信号処理およびダイレクトサンプリングなど、高周波回路とデジタル回路の境界領域の技術が飛躍的に進化し、従来は複雑な回路により構成され高価だった電気電子回路の評価機器（測定器）が安価に入手できるようになった。よって、現状の八戸工業大学における 2 年の学生実験での問題点を改善する為、従来の実験テキストと差し替える形での、電気回路素子を複素インピーダンス素子として本質的に理解させる実験テーマを新たに創出した。具体的には、2017 年度に八戸工大にて学科の経費で新しく購入した機器を用い、従来の交流

回路の測定から学ぶ実験実習科目を種々発展させた。その結果、電気回路の座学で教える交流回路の複素インピーダンスを、実験を通し複素数として理解させた。本報告書では、この実験手順や実施状況につき報告する。この実験は八戸工大一高向け実習テーマとしても有用である。

## 2. 実験に用いた測定器

八戸工大の筆者が所属する学科では、2 年の実験科目における電気回路の交流インピーダンスの測定実習が行われる。その際、LCRメータを用いコンデンサ、コイルの単体素子の静電容量やインダクタンスの素子値の周波数特性および、LCR並列回路などのインピーダンスを測定していた。しかし、この実験では2016年度まで、インダクタ  $L$  [H]とキャパシタ  $C$  [F]の素子値を個別に測定しており、また  $L$ と  $C$ の複合素子のインピーダンスも絶対値として測定結果を比較していた。その為、電気回路の授業などで教える複合素子の入力インピーダンスの計算値である複素インピーダンス形式での表現 ( $Z_0=R+jX$ ) との直感的な対比が困難だった。これに対し、インピーダンスアナライザ（KEYSIGHT TECHNOLOGIESのE4990Aなど）と呼ばれる機器を用いれば、位相特性も含めインピーダンス量を測定できる。しかし本機器は高価で、実験科目での導入として敷居が高いと考えていた。また、アンテナアナライザ（たとえばSEEED社のSARK-110）も複素インピーダンスの測定が可能だが、汎用性や測定精度に疑問を持っていた。これに対し近年、高周波帯での電子回路の電気特性の測定に用いるベクトルネットワークアナライザ（VNA）と呼ばれる機器が安価で入手できるようになった。この測定器は、SマトリクスまたはSパラメータ（散乱行列）<sup>2・5)</sup>という概念により、高周波回路の位相も含めた電磁波の反射・透過電力が測定できる。また、Sパラメータは回路理論により複素インピーダンスへと変換できる。そこで、この機器を用いればRLCの複合回路を  $Z=R+jX$  の複素インピーダンスの表現にて直感的に理解でき

ると考えた。但し、この機器にて精度よく電気回路の電気定数を測定する為には、校正<sup>6・9)</sup>と呼ばれるプロセスを正しく理解する必要がある。そこで今回、このVNAを用い従来の交流インピーダンスに関する実験内容の改善を図った。なお、本実験で用いた機器は、筆者が普段使用している測定器と類似した操作性を期待し、ディエステクノロジー社のDZV-1を選定した。この機器は、アマチュア無線クラブである祖師谷ハムエンジニアリングにより開発され、CQ出版社のRFワールドNo.35にて富井里一氏により公表<sup>10)</sup>されたziVNAuを完成品として製品化したものである。本機器は、USBインターフェース経由でWindows OSが稼働するパーソナルコンピュータに接続することにより、旧HP社のHP8753シリーズと似た操作で100kHzから500MHzにおける2ポートでのSパラメータを、50dB程度のダイナミックレンジにて計測可能となる。

### 3. 新たに作成した実験手順と内容

そこで、このVNA (DZV-1) を用い、交流インピーダンスを本質的に理解する実験課題（実験教材）を構築した。具体的には、複合素子における複素インピーダンスを理解することを目的として、以下の手順にて実験実習を進めることとした。なお、測定周波数範囲は安価で入手性が容易な集中定数素子を測定することを目的として100kHz～900kHzとした。

1. 3種類のインピーダンス標準を用いたインピーダンス校正理論の理解と実践
2. 複素インピーダンスの極座標表示の理解
3. 純抵抗素子（25Ω、100Ω）の測定
4. 純抵抗素子を組み合わせたインピーダンス変換（T型整合回路による75Ωから50Ωへの変換）
5. インダクタンス（コイル）の測定
6. キャパシタンス（コンデンサ）の測定
7. LC並列回路の測定
8. LCR並列回路の測定
9. 並列Lと直列Cによるインピーダンス整合

（100Ωから50Ωへ）

10. 反射係数の測定による電力波（電流）の理解
11. 並列Cと直列Lによるインピーダンス整合（25Ωから50Ωへ）
12. 高周波ケーブルを用いた電気長の変化の計測

なお、紙面の都合により、今回は項目4. 11. および12. の解説は省略する。

### 4. 実験授業の実施例

これらの項目にて、実験実習を通したアクティブ・ラーニングを実践するため、筆者により新たにテキストを作成して学生に配布した。測定器による入力インピーダンスの測定風景を図1に示す。この写真では、測定器のPort1に接続された赤と黒の電線が、ミノムシクリップを介してブレッドボードに接続されている。更にブレッドボードには抵抗、コイル、コンデンサ素子が接続されている。この配線により、 $S_{11}$ の校正後に低周波帯での集中定数素子の正確な複素インピーダンスの測定が可能となる。



図1 VNAによる電子回路素子の測定

そしてまず、項目1の3種類のインピーダンス標準を用いたインピーダンス校正理論の理解と実践結果を表1～3に示す。これより、VNAによる測定値は理論値と一致しており、基準面において100～900kHzの測定帯域にわたり、インピーダンスが正しく校正できていることが確認できる。その際、項目

2の複素インピーダンスの極座標表示の理解を促すため、インピーダンスを極座標として表示可能なスミスチャートを各学生に1枚ずつ配布し、図2に示すように測定結果をプロットさせた。これにより、 $0\Omega$ 、 $50\Omega$ 、 $\infty\Omega$ という概念が視覚的に理解できる。その際、 $50\Omega$ の場合にスミスチャート上の規格化インピーダンスが1.0の点にプロットされることを理解する。そして、 $0\Omega$ は終端短絡、 $50\Omega$ は整合負荷、 $\infty\Omega$ は終端解放という概念の説明は、実際の構造と電気回路とを結びつけるためにも有効と考える。

表1 Short ( $0\Omega$ )の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100 kHz	500 kHz	900 kHz
VNAによる測定値	$4.203 \times 10^{-3} + j 160.643 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-3} - j 300 \times 10^{-6}$	$4.367 \times 10^{-3} + 312.309 \times 10^{-6}$
VNAによる測定値:50 [ $\Omega$ ]	0.2101 + j 0.008	0.07 - j 0.015	0.218 + j 0.016
理論値 [ $\Omega$ ]	$0.000 - j 0.000$	$0.000 - j 0.000$	$0.000 - j 0.000$
理論値との差異 [%]			

表2 Load ( $50\Omega$ )の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100 kHz	500 kHz	900 kHz
VNAによる測定値	$997.397 \times 10^{-3} - j 266.20 \times 10^{-6}$	$997.441 \times 10^{-3} - j 225.55 \times 10^{-6}$	$997.581 \times 10^{-3} - j 154.21 \times 10^{-6}$
VNAによる測定値:50 [ $\Omega$ ]	49.96 - j 0.013	49.87 - j 0.011	49.87 - j 0.012
理論値 [ $\Omega$ ]	$50.00 - j 0.000$	$50.00 - j 0.000$	$50.00 - j 0.000$
理論値との差異 [%]	0.08	0.26	0.26

表3 Open ( $\infty\Omega$ )の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100 kHz	500 kHz	900 kHz
VNAによる測定値	$-3.29 \times 10^{-3} - j 2.464 \times 10^{-3}$	$-3.00 \times 10^{-3} - j 5000 \times 10^{-6}$	$-1.16 \times 10^{-3} - j 2.471 \times 10^{-3}$
VNAによる測定値:50 [ $\Omega$ ]	-16005 - j 12320	165000 - j 0.25	-58200 - j 13705
理論値 [ $\Omega$ ]	$+\infty - j 0.000$	$+\infty - j 0.000$	$+\infty - j 0.000$
理論値との差異 [%]			

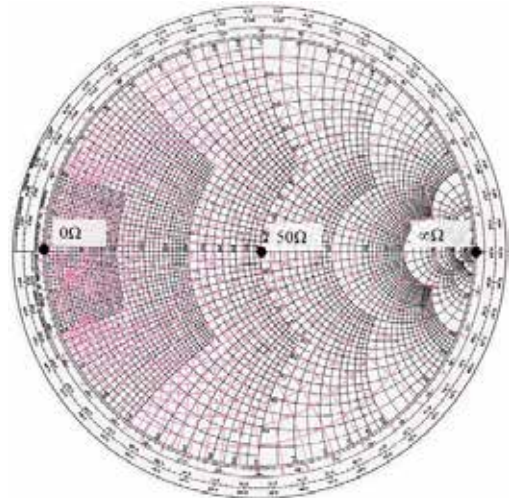


図2 3つのインピーダンス標準の測定結果の極座標プロット

次に、項目3の純抵抗素子 ( $25\Omega$ 、 $100\Omega$ ) の入力インピーダンスの結果を、一例として  $500\text{kHz}$  の場合につき表4~5に示す。これより、抵抗素子が入力インピーダンスが理論値に対して1.4%以内の差異で測定できていることが分かる。その際、重要なのは、純抵抗素子には入力インピーダンスの周波数特性が存在しないことを学生に説明することである。更に、これらの測定結果をスミスチャートにプロットした結果を先の  $50\Omega$  と共に図3に示す。これにより、スミスチャート上では  $25\Omega$  の場合は規格化インピーダンスが0.5、 $100\Omega$  の場合に規格化インピーダンスが2.0の場所にプロットされることが理解できる。

表4 抵抗素子( $25\Omega$ )の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100 kHz	500 kHz	900 kHz
VNAによる測定値		$493.26 \times 10^{-3} - j 738.02 \times 10^{-6}$	
VNAによる測定値:50 [ $\Omega$ ]		24.65- j 36.9	
理論値 [ $\Omega$ ]	$25.00 - j 0.000$	$25.00 - j 0.000$	$25.00 - j 0.000$
理論値との差異 [%]		-1.40	

表5 抵抗素子(100Ω)の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100 kHz	500 kHz	900 kHz
VNA による測定値		1999 - j 3.1×10 <sup>-3</sup>	
VNA による測定値 50 [Ω]		99.5- j 0.001	
理論値 [Ω]	100.00-j 0.000	100.00-j 0.000	100.00-j 0.000
理論値との差異 [%]		0.01	

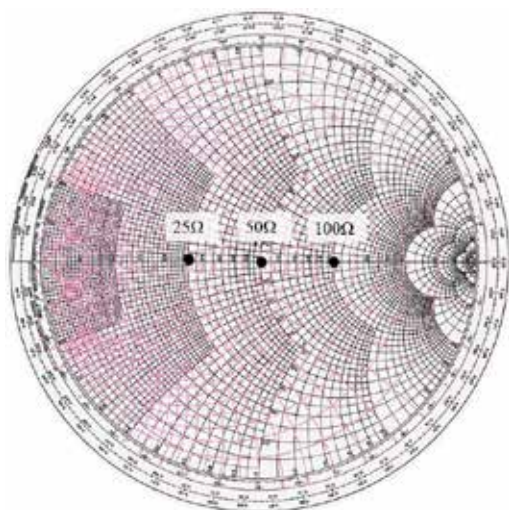


図3 25Ωおよび100Ωの測定結果の極座標プロット

ここまでは純抵抗素子の入力インピーダンスの測定であり、周波数特性が存在しないことから一般的なテスター等でも計測できる。しかし、交流インピーダンスを本質的に理解するためには、キャパシタンスやインダクタンス素子を入力インピーダンスを周波数特性として把握することが重要である。その実践例として、まず項目5のインダクタンス素子の測定を行った。その際、素子値は  $L=330\ \mu\text{H}$  とした。ここで、図4のインダクタンスの入力インピーダンスの理論値は(1)にて計算される。

$$Z_{in} = j\omega L \quad (1)$$

ここで、 $\omega$  は角周波数であり  $\omega=2\pi f$  として計算される。そこで、100、500 および 900kHz の各周波数における入力インピーダンスの測定結果を表6に示す。これより、インダクタンスの測定では、複素インピーダンスの実部が0として測定されて

いることが確認できる。一方、虚部の値は測定値および理論値ともに+となっていることも確認できる。なお、理論値との差異は、各周波数にて8%以内となった。

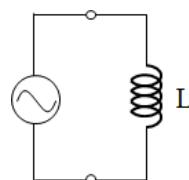


図4 インダクタンス素子の等価回路

表6 L素子の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900 kHz
VNA による測定値 [Ω]	80.0×10 <sup>-3</sup> +j3.82	390×10 <sup>-3</sup> +j19.55	900×10 <sup>-3</sup> +j 37.5
VNA による測定値 50 [Ω]	4.0 +j 191	19.5 +j 977	45 +j 1875
計算値 [Ω]	0 +j 207	0 +j 1037	0+j 1866
計算値との差異 [%]	-7.73	-5.78	+0.48

次に、図5のキャパシタンス素子を入力インピーダンスを測定した。その際、素子値は  $C=470\ \text{pF}$  とした。この回路の理論値は(2)式となる。

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

これに対し、各周波数での測定値を表7に示す。これより、複素インピーダンスの実部が0となる。一方、虚部は測定値および理論値ともに+となる。そして、各周波数において測定値と計算値との差異は13%となった。

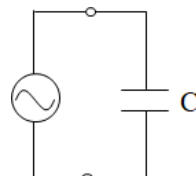


図5 キャパシタンス素子の等価回路



表 7 C 素子の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900kHz
VNA による 測定値[Ω]	$900 \times 10^{-3}$ $-j 75.5$	$210 \times 10^{-3}$ $-j 15.1$	$130 \times 10^{-3}$ $-j 8.45$
VNA による 測定値・50[Ω]	$45-j 3777$	$10.5-j 755$	$6.5-j 422$
計算値[Ω]	$0-j 3386$	$0-j 677$	$0-j 375$
計算値との 差異[%]	+11.6	+11.5	+12.5

更に、これらの L 素子および C 素子の測定値をスミスチャートにプロットした結果を図 6 に示す。これより、リアクタンス素子単体の場合には全反射であり、スミスチャートの外側に位置している。一方、インピーダンスは周波数に対して変化し、周波数特性の存在が確認できる。更に、リアクタンスの場合には＋、キャパシタンスの場合には－に位置することも視覚的に確認できる。

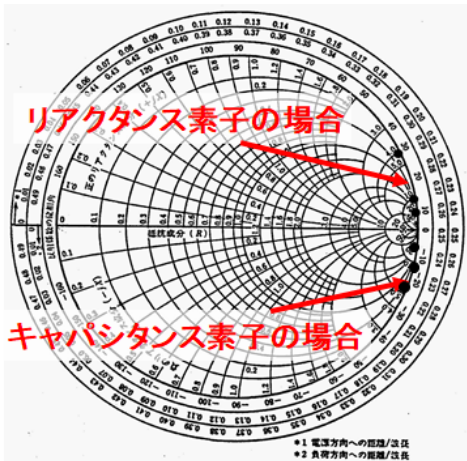


図 6 リアクタンス・キャパシタンス素子の極座標プロット

次に、100～900kHz の周波数帯域にわたり、図 7 の LC 並列回路における入力インピーダンスを測定した。その際、素子値は  $L=330 \mu\text{H}$  および  $C=470 \text{ pF}$  とした。この場合の理論値は

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \quad (3)$$

として計算される。100、500 および 900kHz での入力インピーダンスの測定結果を理論値と共に表 8 に示す。これより、理論値における複素インピーダンスの実部はゼロであり、虚部の理論値と測定値の差異は各周波数において 16%以内となった。なお、500kHz の場合に他の周波数よりも差異が大きいのは、共振周波数近傍では虚部の値が $-\infty$ から $+\infty$ へと急激に変化することが理由として考えられる。更に、これらの測定結果をスミスチャートにプロットした結果を図 8 に示す。これより、500kHz 周辺にて虚部が 0 となる共振状態となっている。この様に、入力インピーダンスを極座標として、虚部が＋から－へと遷移する周波数特性が視覚的に確認できる。

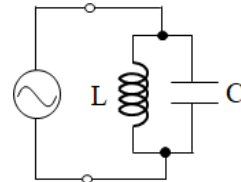


図 7 LC 並列回路の等価回路

表 8 LC 並列回路の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900kHz
VNA による 測定値[Ω]	$112.132 \cdot 10^{-3}$ $+j 4.322$	5.432 $-j 59.582$	$336.272 \cdot 10^{-3}$ $-j 11.101$
VNA による 測定値・50[Ω]	5.607 $+j 216.100$	271.600 $-j 2979.0$	16.814 $-j 555.05$
計算値[Ω]	0.000 $+j 219.650$	0.000 $-j 2589.0$	0.000 $-j 527.505$
計算値との 差異[%]	-1.62	+15.1	+5.22

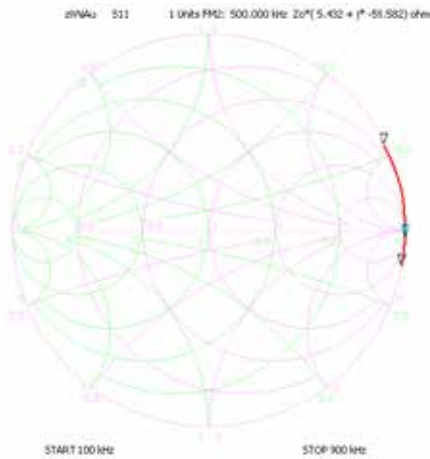


図 8 LC並列回路のスミスチャートでの確認

最後に、図 9 に示す LCR 並列回路の入力インピーダンスを測定した。この回路では、(4)式に示す理論値の通り、入力インピーダンスに実部と虚部の両方が存在する複素数として表現される。その際、素子値は  $L=330\ \mu\text{H}$ 、 $C=220\text{pF}$  および  $50\ \Omega$  とした。100、500 および 900kHz での入力インピーダンスの測定結果を理論値と共に表 9 に示す。これより、実部は各周波数において両者が 2.6%以内で良好に一致した。一方、虚部は 500 および 900kHz における差異が大きいが、これは値が小さいため、差異として大きく見える。更に、これらの測定結果をスミスチャートにプロットした結果を図 8 に示す。これより、500kHz 周辺において規格化インピーダンスの実部が 1.0、虚部が 0 となる共振状態となっている。この様に、極座標での虚部が+から-へと遷移する入力インピーダンスの周波数特性が視覚的に確認できる。

$$Z_m = \frac{1}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C} \quad (4)$$

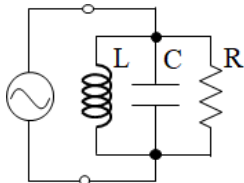


図 9 LCR並列回路の等価回路

表 9 LCR 並列回路の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900 kHz
VNA による 測定値 [Ω]	$940.31 \cdot 10^{-3}$ $+j216.57 \cdot 10^{-3}$	$985.91 \cdot 10^{-3}$ $-j7.736 \cdot 10^{-3}$	$973.08 \cdot 10^{-3}$ $-j62.88 \cdot 10^{-3}$
VNA による 測定値 50 [Ω]	47.015 $+j10.829$	49.295 $-j0.387$	48.654 $-j3.144$
計算値 [Ω]	47.399 $+j11.102$	49.991 $+j0.683$	49.937 $-j1.768$
計算値との 差異 [%]	-0.81 -2.46	-1.39 -156.7	-2.56 +77.83

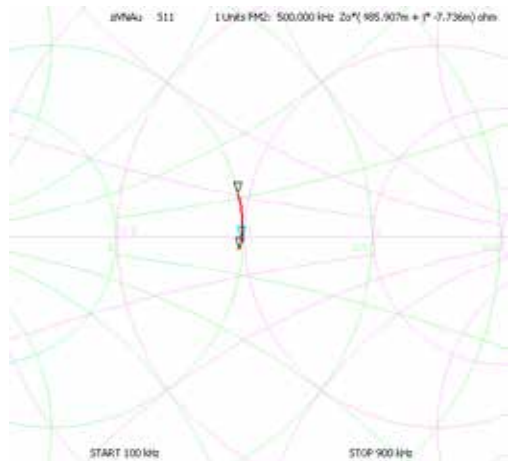


図 10 LCR並列回路のスミスチャートでの確認

## 5. インピーダンス整合の理解

この様に、交流インピーダンスの測定値を極座標表示として視覚的に確認できた。そこで更に回路設計の応用として、高周波回路等によく用いられるインピーダンス整合を実験として実践してみる。具体的には、先の図 11 に示すように  $100\ \Omega$  の抵抗の前に並列のインダクタンスおよび直列のキャパシタンスを取り付け、中心周波数の 500kHz にて  $50\ \Omega$  へと整合することを試みる。この場合、まず  $100\ \Omega$  の規格化インピーダンス  $Z=2.0 - j0.0$  に対して、並列のインダクタンスを取り付けることにより、500kHz にて  $Z=1.0 - j1.0$  へと変化させる必要がある。そのための素子値として  $L=33\ \mu\text{H}$  を選択した。この場合の入力インピーダンスの理論値は(5)式にて表される。この条件における LR 並



列回路の測定結果を表 10 に示す。更に、この状態における入力インピーダンスをスミスチャートにプロットした結果を図 12 に示す。これより、500kHz において規格化インピーダンスが  $Z=1.0-j1.0$  となる。

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{j\omega L}} \quad (5)$$

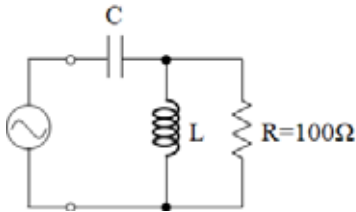


図 11 並列L直列Cによる整合回路

表 10 LR 並列回路の入力インピーダンスの測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900kHz
VNA による測定値 [Ω]	$89.543 \cdot 10^{-3}$ $+j353.67 \cdot 10^{-3}$	$930.716 \cdot 10^{-3}$ $+j978.55 \cdot 10^{-3}$	1.478 $+j865.59 \cdot 10^{-3}$
VNA による測定値 50 [Ω]	+4.477 $+j17.683$	46.536 $+j48.927$	73.900 $+j43.279$
計算値 [Ω]	+4.194 $+j20.045$	+52.254 $+j49.949$	+78.002 $+j41.423$
計算値との差異 [%]	+6.75 -11.78	-10.94 -2.05	-5.26 +4.48

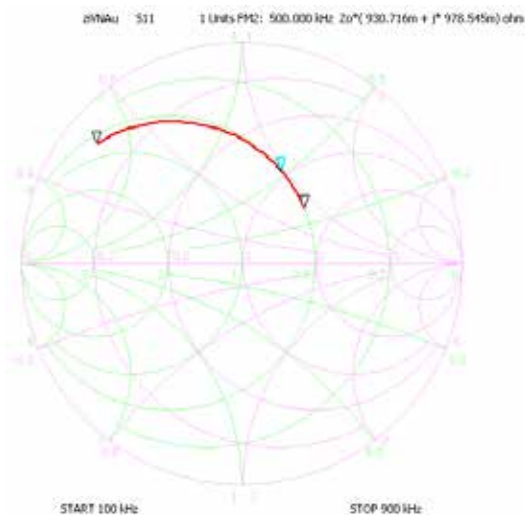


図 12 LR 並列回路のスミスチャートでの確認

そこで更に、LR 並列回路の手前に図 11 の通り、 $0.010\mu\text{F}=10000\text{pF}$  と  $0.022\mu\text{F}=22000\text{pF}$  を直列に接続することにより得られる  $6875\text{pF}$  のキャパシタンスを先の回路の手前に直列に接続した。この場合の入力インピーダンスの理論値は(6)式にて表される。

$$Z_{in} = \frac{1}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{j\omega C}} \quad (6)$$

この条件における入力インピーダンスの測定結果を表 11 に示す。そして更に、入力インピーダンスをスミスチャートにプロットした結果を図 13 に示す。その結果、500kHz にて規格化させた入力インピーダンスの測定値は  $1.0-j0.0\Omega$  に近い値となった。また、規格化インピーダンスを 50 倍すると  $Z_{in}=52.254+j3.139$  となり、計算値との差異は実部で 1.04%、虚部で -61.0%の差異となった。虚部の差異の要因として、値自体が小さいことや、キャパシタンスおよびインダクタンスの実測値と計算値の差異が考えられる。

表 11 LR 並列 C 直列回路の入力インピーダンス測定結果

項目 \ 周波数	100kHz	500kHz	900kHz
VNA による測定値 [Ω]	$149.552 \cdot 10^{-3}$ $-j4.407$	1.056 $+j24.484 \cdot 10^{-3}$	1.580 $+j288.70 \cdot 10^{-3}$
VNA による測定値 50 [Ω]	7.478 $-j220.35$	52.800 $+j1.224$	79.0 $+j14.435$
計算値 [Ω]	4.194 $-j214.01$	52.254 $+j3.139$	78.0 $+j15.417$
計算値との差異 [%]	+78.3 +2.96	+1.04 -61.0	+1.28 -6.37

そして更に、この状態で入力インピーダンスを反射減衰量 (Sパラメータ, ここでは  $S_{11}$ ) として確認した結果を図14に示す。これより、500kHz 周辺で反射減衰量が -25.0dB となり、回路に入力された電力が  $25\Omega$  の抵抗にてほぼ吸収される。つまり、適切な説明を行えば項目 10. の電力波(電力流)<sup>2,3)</sup> について理解を深められると考える。

なお、紙面の都合上省略するが、同様の要領で  $25\Omega$  の手前に並列のキャパシタンスと直列のインダクタンスを取り付け、 $50\Omega$  へと整合させることも、実習として学ばせられる。

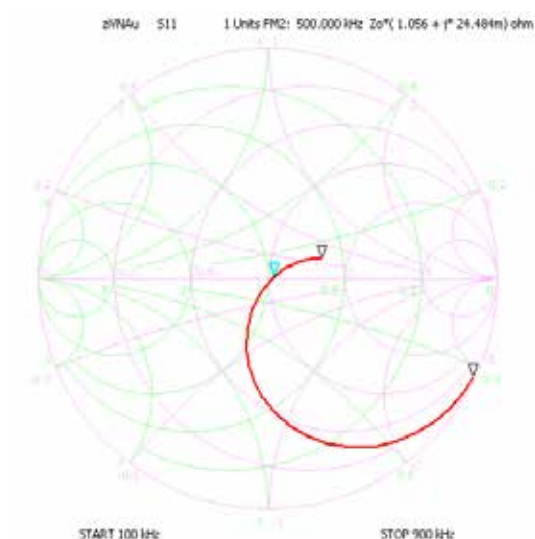


図 13 LR並列C直列回路のスミスチャートでの確認

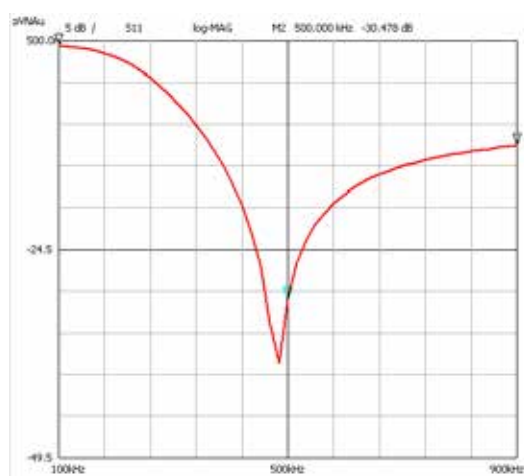


図14 LR並列C直列回路の反射減衰量（ $S_{11}$ ）での確認

## 6. 実験の様子と所感

これらの教材を用い、2017年度の後期に学部2年生を対象に複数回にわたり実験授業を実施した。具体的には、一班を4名程度とし、指導教員の下で上記に説明した各種の集中定数素子や、それらを組み合わせた電気回路の複素インピーダンスを測定し、理論値との比較を行った。この時の様子を図15～20に示す。今回は図18に示す通り、本テ

ーマを共同開発した学部4年生により実験指導を行った回もあったが、指導学生の元、スムーズに実習ができていた。特に、実験を進めるにあたり、図19に示す様にホワイトボードを駆使して各回路に対して理論値の導出も並行して行ったが、これらの作業は学生の理解の助けになったと考える。また、最後には図20に示す様に、同じくホワイトボードにて本実験で学んだことを総括した。これらをまとめてレポートとして翌週に提出された各学生のレポートを指導教員が添削する形で、事後指導を行った。これら一連の作業を通し、学生は普段座学で学んでいる電気回路の理論と対応した実際のLCR素子を組み合わせた回路による測定、考察およびレポート作成から複素数としての交流インピーダンスの概念について理解が深まった。

筆者の所感として、交流インピーダンスの本質を理解していない教員は、複素インピーダンスと静電容量、インダクタンスとの関係を一体的に理解できていないと思われる。このことは、電磁気学では静電界、静磁界と電磁界の関係を一体的に理解できていない教員とも類似する。

今後は、電気電子工学に関わる学科教員に対するこれらの指導および、電磁気学を本質的に理解する実験教材の開発が、筆者および当該学科の課題と考える。



図15 実験風景1



図16 実験風景2

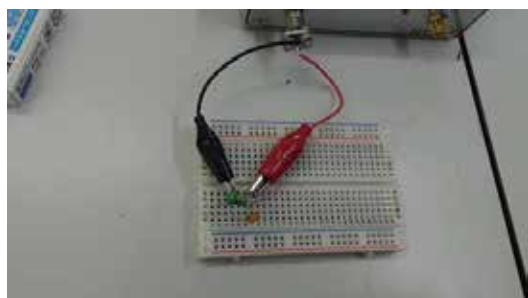


図17 実験風景3



図18 実験風景4

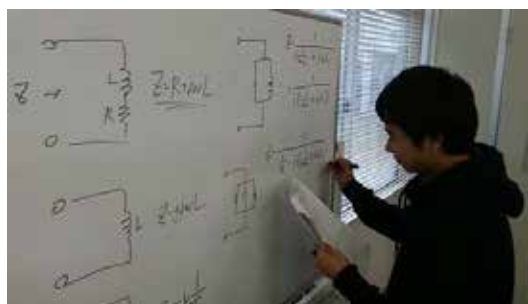


図19 実験風景5

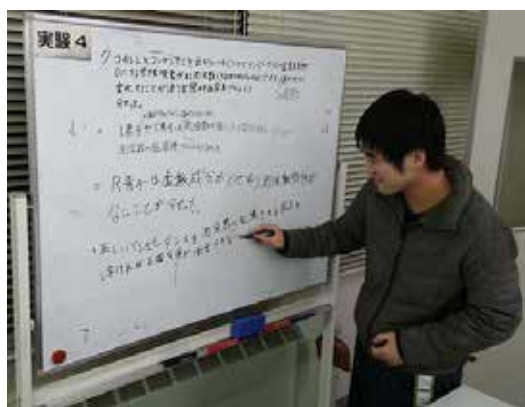


図20 実験風景6

## 7. おわりに

本報告では、交流インピーダンスを本質的に理解する実験テーマの創出と、その一連の実践手法について解説した。そのため、2017年度に筆者の所属する学科の経費にて、近年安価で入手できるようになった、ベクトルネットワークアナライザ（VNA）を導入し、LCRを組み合わせた電気回路の電気特性を測定する実験実習へと応用した。そして実際に学部2年生に対してこれらの指導を行うことで、電気回路の等価回路と対応させた理論式の導出、ブレッドボードを駆使した回路の構築、測定機器の校正、作成した電気回路の入力インピーダンス特性の測定と結果の考察、グループでの議論、得られたことのまとめ、レポートの作成と添削を通し、普段電気回路等の座学で享受される授業内容と対比し、電気回路の本質が理解できるようになったと考える。

本実験テーマでは、従来の高価な測定器が必要が無い。そのため、たとえば工業高校などでの電気回路の回路特性の測定の実習等にも有効と思われる。よって今後は高大連携などを通し、近隣の工業高校である八戸工業高校や八戸工業大学第一高等学校の生徒に対する実験指導などへも発展させたい。

## 謝辞

本実験テーマの作成にあたり、ベクトルネットワークアナライザ *ziVNAu* における、ポート・エクステンション機能の使用法について懇切丁寧にご教授を頂きました富井里一氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) C. G. Montgomery, R. H. Dicke, and E. M. Purcell, "Principles of Microwave Circuits," MIT Radiation Laboratory Series Vol. 8, McGraw-Hill, New York, 1948.
- 2) 黒川兼行 "マイクロ波回路入門," 丸善, 1963.
- 3) K. Kurokawa, "Power Waves and the Scattering Matrix," IEEE Trans. Microw. Theory and Tech., Vol. MTT-13, No.3, pp.194-202, 1965-3.
- 4) T. S. Chu and T. Itoh, "Generalized Scattering Matrix Method for Analysis of Cascaded and Offset Microstrip Step Discontinuities," IEEE Trans. Microw. Theory and Tech., Vol. MTT-34, No.2, pp.280-284, 1986-2.
- 5) A. S. Omar and K. Shunemann, "Transmission matrix representation of finline discontinuities," IEEE Trans. Microw. Theory and Tech., Vol. MTT-33, No. 9, pp. 765-770, 1985-9.
- 6) S. Rehnmark, "On the Calibration Process of Automatic Network Analyzer Systems," IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-22, No. 4, pp 457-458, 1974-4.
- 7) D. Rytting, "Network Analyzer Error Models and Calibration Methods," Agilent Technology Application Note.
- 8) "HP 8753D Network Analyzer, User's Guide," Hewlett-Packard
- 9) D. Ballo, "Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements," Microwave Journal, 1998-3.
- 10) 富井 里一, CQ 出版社編集部, "作る! ベクトル・ネットワーク・アナライザ, USB 接続で 500MHz まで測れる VNA の設計と製作," RF ワールド No. 35, CQ 出版社, 2016-8.
- 11) Hewlett-Packard, "Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis," Agilent Application note 5965-7707E, 1997.

## 要 旨

本報告では、電気回路の複素インピーダンスの周波数特性の測定を通した、交流インピーダンスを本質的に理解する実験テーマの創出と、その一連の教授法および手順について解説する。具体的には、まず目的達成のため 2017 年度に筆者が所属する大学・学科の経費にて、近年安価に入手できるようになったベクトルネットワークアナライザ (VNA) を新たに購入した。そして、LCR 素子を組み合わせた周波数特性も含む電気回路の電気特性を測定する実験実習へと応用させた。そして実際に、指導用のテキストを作成しつつ、学部 2 年生に対してこれらの指導を行った。その結果、電気回路の等価回路と対応させた理論式の導出、ブレッドボードを用いた電気回路の構築、測定機器の校正、作成した電気回路による入力インピーダンス特性の測定、結果の考察、グループでの議論、得られた事象のまとめ、レポートの作成および添削を通した指導を行った。これより、普段電気回路等の座学で享受されている授業内容との対比により、電気回路の本質が理解できるようになったと考える。本実験テーマでは、従来の高価な測定器が不要である。そのため、工業高校などでの電気回路の回路特性の測定の実習等にも有効と思われる。よって今後は高大連携などを通し、たとえば近隣の工業高校である、八戸工業高校や八戸工業大学第一高等学校の生徒に対する実験指導等へも発展させる必要があると考える。

**キーワード:** 入力インピーダンス, Sパラメータ, ベクトルネットワークアナライザ, VNA, 校正